

Questão 28. Não são errôneas todas as hipóteses segundo as quais a luz consistiria em pressão ou movimento propagados através de um meio fluido? Pois em todas essas hipóteses os fenômenos da luz têm sido explicados até aqui supondo-se que eles resultam de novas modificações dos raios, o que é uma suposição errônea.

Se a luz consistisse apenas em pressão propagada sem movimento real, ela não seria capaz de agitar e aquecer os corpos que a refratam e refletem. Se consistisse num movimento propagado a todas as distâncias num instante, requeria uma força infinita a todo momento, em toda partícula brilhante, para gerar esse movimento. E se consistisse em pressão ou movimento propagado ou num instante ou no tempo, ela se curvaria para a sombra. Pois pressão ou movimento não podem ser propagados em um fluido em linhas retas além de um obstáculo que intercepta parte do movimento, mas se curvarão e se espalharão em todas as direções no meio quiescente que está além do obstáculo. A gravidade tende para baixo, mas a pressão da água que resulta da gravidade tende para todas as direções com força igual e é propagada tão prontamente e com tanta força lateralmente quanto para baixo e tanto através de passagens curvas como através de passagens retas. As ondas sobre a superfície da água estagnada, ao passarem perto dos lados de um objeto largo que intercepta uma parte delas, curvam-se depois e dilatam-se gradualmente para dentro da água estagnada por trás do obstáculo. As ondas, pulsações ou vibrações do ar que constituem os sons curvam-se manifestamente, embora não tanto quanto as ondas da água. Pois um sino ou um canhão podem ser ouvidos além de uma colina que intercepta a visão do corpo sonoro, e os sons se propagam tão prontamente através de tubos curvos como através de tubos retos. Mas nunca se soube de a luz seguir passagens curvas nem de

se curvar para a sombra¹¹². Pois as estrelas fixas deixam de ser vistas devido à interposição de qualquer dos planetas. E assim o fazem as partes do Sol pela interposição da Lua, de Mercúrio ou de Vênus. Os raios que passam muito próximos das bordas de qualquer corpo são um pouco curvados pela ação do corpo, como mostramos acima; mas essa curvatura não se dá em direção à sombra, mas a partir da sombra^{94 e 112}, e é executada apenas na passagem do raio perto do corpo e a uma distância muito pequena dele. Tão logo o raio tenha passado pelo corpo, segue em linha reta.

Até aqui ninguém tentou (que eu saiba) explicar a refração extraordinária do cristal-da-islândia pela pressão ou movimento propagados, exceto Huygens, que para esse fim imaginou dois meios vibratórios distintos dentro desse cristal. Mas, quando examinou as refrações nos dois pedaços sucessivos desse cristal e encontrou-as tal como está mencionado acima, confessou-se embaraçado para explicá-las!

E levanta-se uma grande objeção contra a hipótese de se preencher o firmamento com meios fluidos, a não ser que sejam extremamente rarefeitos, devido aos movimentos regulares e duradouros dos planetas e cometas em todos os tipos de trajetórias através do firmamento. Pois isso deixa manifesto que o firmamento é destituído de qualquer resistência perceptível e, por conseqüência, de qualquer matéria perceptível.

De fato, o poder de resistência dos meios fluidos resulta em parte do atrito das partes do meio e em parte da *vis inertiae* [inércia] da matéria. A parte da resistência de um corpo esférico que resulta do atrito das partes do meio é muito aproximadamente proporcional ao diâmetro, ou, no máximo, ao produto do diâmetro e da velocidade do corpo esférico conjuntamente. E a parte da resistência que resulta da *vis inertiae* da matéria é proporcional ao quadrado

desse produto. E por essa diferença os dois tipos de resistência podem ser distinguidos um do outro em qualquer meio; e, sendo assim distinguidos, verifica-se que quase toda a resistência dos corpos de uma magnitude adequada que se movem no ar, na água, no mercúrio e em fluidos semelhantes com uma velocidade adequada resulta da *vis inertiae* das partes do fluido.

Ora, a parte do poder de resistência de qualquer meio que resulta da tenacidade, fricção ou atrito das partes do meio pode ser diminuída dividindo-se a matéria em partes menores e tornando-se as partes mais lisas e escorregadias; mas a parte da resistência que resulta da *vis inertiae* é proporcional à densidade da matéria e não pode ser diminuída dividindo-se a matéria em partes menores nem por nenhum outro expediente senão diminuindo a densidade do meio. Por isso a densidade dos meios fluidos é muito aproximadamente proporcional à sua resistência. Os líquidos que não diferem muito em densidade, como a água, o vinho, a essência de terebintina e o óleo quente, não diferem muito em resistência. A água é treze ou catorze vezes mais leve do que o mercúrio e, portanto, treze ou catorze vezes mais rarefeita, e sua resistência é menor do que a do mercúrio na mesma proporção, ou aproximadamente, como verifiquei por experiências feitas com pêndulos¹¹⁴.

oitocentas ou novecentas vezes mais leve do que a água, e portanto oitocentas ou novecentas vezes mais rarefeito, e por isso sua resistência é menor do que a da água na mesma proporção, ou aproximadamente, como também verifiquei por experiências feitas com pêndulos. E no ar mais rarefeito a resistência é ainda menor, até que, rarefazendo o ar, ela se torna imperceptível. Pois pequenas penas caindo ao ar livre encontram grande resistência, mas num vidro alto bem esvaziado de ar elas caem tão rápido quanto o chumbo ou o ouro, como me foi dado comprovar diversas vezes. Daí que a resistência pareça ainda diminuir proporcionalmente à densidade do fluido. Pois não verifico por nenhuma experiência que os corpos que se movem no mercúrio, na água ou no ar encontrem qualquer outra resistência perceptível, excetuada a que resulta da densidade e tenacidade desses fluidos perceptíveis, como a encontrariam se os poros desses fluidos, e todos os outros espaços, fossem preenchidos com um fluido denso e sutil. Ora, se a resistência em um recipiente bem esvaziado de ar fosse apenas cem vezes menor do que ao ar livre, ela seria aproximadamente 1 milhão de vezes menor do que no mercúrio. Mas ela parece ser muito menor em tal recipiente, e muito menor ainda no firmamento, à altura de 300 ou 400 milhas da Terra, ou acima. Pois o Sr. Boyle mostrou que o ar pode ser rarefeito mais de 10 mil vezes em recipientes de vidro; e o firmamento é muito mais vazio de ar do que qualquer vácuo que possamos fazer aqui embaixo. Pois, como o ar é comprimido pelo peso da atmosfera que o contém, e como a densidade do ar é proporcional à força que o comprime, segue-se por cálculo que à altura de aproximadamente 7,5 milhas inglesas da Terra o ar é 4 vezes mais rarefeito do que na superfície da terra; e à altura de 15 milhas ele é $\frac{1}{6}$ vezes mais rarefeito do que na superfície da Terra; e à altura de $22\frac{1}{2}$, 30 ou 38 milhas, ele é respectivamente 64, 256 ou 1 024 vezes mais rarefeito, ou aproximadamente; e à altura de 76, 152, 228 milhas, ele é aproximadamente 1 000 000, 1 000 000 000 000, ou 1 000 000 000 000 000 000 de vezes mais rarefeito, e assim por diante.

O calor provoca muita fluidez a diminuir a tenacidade dos corpos. Ele torna fluidos muitos corpos que não são fluidos no frio, e aumenta a fluidez dos líquidos tenazes, como o óleo, o bálsamo e o mel, diminuindo assim a sua resistência. Mas não diminui consideravelmente a resistência

da água, como o faria se qualquer parte considerável da resistência da água resultasse do atrito ou tenacidade de suas partes. Portanto, a resistência da água decorre principalmente e quase por inteiro da *vis inertiae* de sua matéria; assim, se o firmamento fosse tão denso quanto a água, não teria uma resistência muito menor do que a água; se fosse tão denso quanto o mercúrio, não teria uma resistência muito menor do que a do mercúrio; se fosse absolutamente denso, ou cheio de matéria sem nenhum vácuo, não sendo nunca a matéria tão sutil e fluida, teria uma resistência maior do que a do mercúrio. Um globo sólido nesse meio perderia mais da metade de seu movimento ao mover-se o equivalente a três vezes o comprimento de seu diâmetro, e um globo não-sólido (como os planetas) seria retardado mais cedo. Portanto, a fim de abrir caminho para os movimentos regulares e duradouros dos planetas e cometas, é necessário esvaziar o firmamento de toda matéria, exceto, talvez, alguns vapores muito rarefeitos, exalações ou eflúvies que provêm das atmosferas da Terra, dos planetas, dos cometas e daquele meio etéreo extremamente rarefeito que descrevemos acima. Um fluido denso pode ser incapaz de explicar os fenômenos da natureza, e sem ele se explicam melhor os movimentos dos planetas e cometas. Ele serve apenas para perturbar e retardar os movimentos desses grandes corpos e para fazer definhar a estrutura da natureza; e, nos poros dos corpos, serve apenas para deter os movimentos vibratórios de suas partes, nos quais consistem seu calor e sua atividade. E, sendo inútil, impedindo as operações da natureza e fazendo-a definhar, não há evidência de sua existência; portanto, deve-se rejeitá-lo. E, se o rejeitarmos, as hipóteses segundo as quais a luz consiste em pressão ou movimento propagados através de tal meio serão igualmente rejeitadas.

E para rejeitar esse meio contamos com a autoridade dos filósofos mais antigos e celebrados da Grécia e da Fenícia, que fizeram do vácuo dos átomos e da gravidade dos átomos os princípios basilares de sua filosofia, atribuindo tacitamente a gravidade a alguma outra causa que não à matéria densa. Filósofos posteriores baniram a consideração de tal causa da filosofia natural.

O que há em lugares quase desprovidos de matéria, e por que motivo o Sol e os planetas gravitam em direção um ao outro, sem matéria densa entre eles? Por que a natureza não faz nada em vão, e por que razão surge toda essa ordem e beleza que vemos no mundo? Para que servem os cometas, e por que motivo os planetas se movem todos de uma

mesma maneira em órbitas concêntricas, enquanto os cometas se movem de todas as maneiras em órbitas muito excêntricas? E o que impede as estrelas fixas de caírem umas sobre as outras? Como vieram os corpos dos animais a ser planejados com tanta arte, e para que fins foram planejadas suas várias partes? Foi o olho planejado sem habilidade em óptica, e o ouvido sem conhecimento dos sons? Como decorrem da vontade os movimentos do corpo, e por que existe o instinto nos animais? Não é o sensorio dos animais o lugar onde está presente a substância sensitiva e para o qual são transportadas as imagens perceptíveis das coisas através dos nervos e do cérebro, que ali podem ser percebidas por sua presença imediata nessa substância? E, sendo estas coisas tratadas corretamente, não se segue do exame dos fenômenos que há um Ser incorpóreo, vivo, inteligente, onipresente, que no espaço infinito (como se fosse em seu sensorio) vê as coisas em si mesmas, intimamente, e as percebe completamente, e as compreende inteiramente pela presença imediata delas? Dessas coisas, apenas as imagens levadas através dos órgãos do sentido para o interior de nossos pequenos sensorios são ali vistas e observadas por aquilo que em nós percebe e pensa. E, embora todo passo verdadeiro dado nessa filosofia não nos conduza imediatamente ao conhecimento da causa primeira, ele nos aproxima dela, e por esta razão deve ser tido em alta conta.

Questão 29. Os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham? Pois tais corpos atravessarão meios uniformes em linhas retas sem se curvar em direção à sombra, o que é da natureza dos raios de luz. Também serão capazes de possuir várias propriedades, e de conservar imutáveis suas propriedades ao atravessar vários meios, o que é outra condição dos raios de luz. As substâncias transparentes agem sobre os raios de luz a distância, refratando-os, refletindo-os e inflectindo-os, e os raios agitam reciprocamente as partes dessas substâncias a distância para aquecê-las; e essa ação e reação a distância assemelha-se muito a uma força atrativa entre os corpos. Se a refração for efetuada pela atração dos raios, os senos de incidência deverão estar para os senos de refração em uma dada proporção, como mostramos em nossos princípios de filosofia¹¹⁵. E esta regra é corroborada pela experiência. Os raios de luz, ao saírem do vidro para o vácuo, curvam-se em direção ao vidro; e, se incidem muito obliquamente sobre o vácuo, tornam a curvar-se para dentro do vidro e são totalmente refletidos; e essa reflexão não pode ser atribuída à resistência de um vácuo absoluto, mas deve ser causada pelo poder do vidro de atrair os raios em suas saídas para o vácuo e de trazê-los de volta.

Pois se a superfície mais distante do vidro for umedecida com água ou óleo claro, ou mel líquido e claro, os raios que de outra maneira seriam refletidos irão para dentro da água, do óleo ou do mel; portanto, não são refletidos antes de chegar à superfície mais distante do vidro e começar a sair dele. Se saírem dele para dentro da água, do óleo ou do mel, eles continuarão, porque a atração do vidro é quase contrabalançada e torna-se ineficaz pela atração contrária do líquido. Mas, se saírem dele para entrar num vácuo que não tem atração para contrabalançar a do vidro, a atração do vidro ou os curva e refrata, ou os traz de volta e os reflete]

Para se produzir toda a variedade de cores e graus de refringência, basta que os raios de luz sejam corpos de tamanhos diferentes, os menores dos quais podem produzir violeta, a mais fraca e a mais escura das cores, e ser mais facilmente desviados da trajetória reta pelas superfícies refratoras; e os restantes, à medida que se tornam cada vez maiores, podem produzir as cores mais fortes e mais lúcidas (azul, verde, amarelo e vermelho) e ser desviados cada vez mais dificilmente. Para colocar os raios de luz em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, basta que eles sejam corpúsculos que por seus poderes de atração, ou por alguma outra força, excitam vibrações naquilo sobre que agem, vibrações essas que, sendo mais rápidas do que os raios, os ultrapassem sucessivamente e os agitem de modo a aumentar e diminuir alternadamente suas velocidades, colocando-os assim nesses estados.

↑ Uma palavra também deve ser dita sobre as Questões do fim do livro.

Embora se apresentem na forma interrogativa, todas começam na negativa (exemplos: Questão 1. Os corpos não agem sobre a luz a distância...?; Questão 29. Os raios de luz não são corpos minúsculos emitidos pelas substâncias que brilham?) Esse fato e a argumentação que se segue a algumas das questões (em geral começam assim: Pois...) deixam claro que Newton reponderia com um sim enfático a todas essas questões. Talvez, ao expor suas crenças e convicções em forma de questões, ele estivesse querendo mais uma vez se esquivar de críticas e controvérsias. De qualquer forma, podemos sentir-nos privilegiados com isso (coisa que não havia ocorrido, por exemplo, com os *Principia*), já que nos dá a oportunidade de vivenciar com suas palavras sua própria visão de mundo, perceber suas intuições sobre o funcionamento da natureza, observar suas idéias e o encadeamento de seu raciocínio.

Dessas questões ficou evidente, para seus contemporâneos e para os cientistas posteriores, que Newton defendia a teoria corpuscular da luz. Contrariamente a ele temos Descartes, Hooke e Huygens, que defendiam a idéia de que a luz era a pressão ou o movimento transmitido através de um meio que preenchia o espaço (não vamos esmiuçar aqui essas concepções, mas deve-se ressaltar que, apesar de todos eles aceitarem essa idéia geral, há diferenças importantes em suas concepções). Durante o século XVIII o modelo corpuscular ou balístico da luz foi o dominante, em boa parte devido à posição de destaque que Newton adquiriu com a lei da gravitação universal e a formulação da mecânica. Nas duas primeiras décadas do século XIX a situação mudou radicalmente com o advento dos trabalhos de Young e Fresnel, que introduziram os conceitos da interferência de ondas e de que a luz é constituída por vibrações (em um meio) transversais à direção de propagação. Com o sucesso dessa teoria ondulatória da luz (cujo coroamento foi a teoria eletromagnética de Maxwell), a teoria corpuscular passou a ser vista apenas como uma curiosidade histórica e o interesse pela *Óptica* de Newton atingiu o ponto mínimo. Um dos efeitos dessa mudança conceptual foi que o livro deixou de ser reeditado desde o fim do século XVIII até 1931. Nesse ano ele foi reeditado em Londres (G. Bell and Sons), aparecendo novamente em 1952 pela editora Dover (New York)¹⁰. Ainda em 1952 ele foi incluído, juntamente com os *Principia*, na coleção *The Great Books of the Western World* (Encyclopaedia Britannica)¹¹, e desde então o interesse pela *Óptica* só tem aumentado. Os motivos principais desse interesse renovado foram, entre outros, o renascimento do modelo corpuscular da luz, com os trabalhos de

Einstein sobre os fótons e o efeito fotoelétrico (além dos trabalhos de Compton e outros que se têm seguido desde então) e o nascimento da teoria quântica de Planck. De fato, como se pode ver nas questões do fim deste livro, Newton advoga uma interconexão entre os corpúsculos de luz, o éter e a matéria. O éter e suas ondas ou vibrações seriam os intermediários entre a luz e a matéria. As vibrações do éter seriam mais rápidas que a velocidade da luz e, ao ultrapassá-la, ele colocaria a luz alternadamente em estados de fácil reflexão e fácil refração (conceitos introduzidos por Newton para explicar a formação dos anéis de cores). Para Newton a luz, ao ser refletida ou refratada, excita vibrações no éter, e seria através dessas vibrações que a luz transmitiria o calor aos corpos. Não só a refração seria causada por diferenças de densidade desse éter como também a gravitação seria provocada por um princípio semelhante. Apesar de Newton aceitar a existência de um éter e de suas vibrações, e da conexão éter-luz-matéria, a luz seria distinta dessas vibrações do éter. De qualquer forma, não se deve superestimar essas analogias entre os corpúsculos de luz de Newton e os fótons ou *quanta* de luz do século XX, o mesmo valendo para as interconexões entre os corpúsculos de luz e as ondas ou vibrações do éter de Newton. A física do século XX é o resultado de conceitos e descobertas que não podiam ter sido previstos na época de Newton e que foram fundamentais para moldar nossa visão atual de mundo (como exemplo citamos a descoberta de Oersted, em 1820, da ligação entre eletricidade e magnetismo, e a descoberta da radiatividade).

A crença de Newton num modelo corpuscular da luz parece ter brotado de três fontes principais. A primeira foi o atomismo existente na época, que, embora tivesse ficado esquecido por quase dois mil anos, foi retomado em grande parte graças a Pierre Gassendi (1592-1655), padre e professor do Collège de France, em Paris. Gassendi reintroduziu as idéias de Demócrito, Epicuro e Lucrécio, usando, para explicar os fenômenos da natureza, as idéias de vácuo, matéria e movimento. No período de 1641 a 1646 travou uma grande polêmica com Descartes e desde então suas idéias passaram a ser amplamente conhecidas¹². Newton, em particular, chegou a estudar as obras de Gassendi¹³. Uma diferença fundamental, que vai aparecer mais tarde, entre Newton e Descartes (para quem não havia o vácuo, sendo o universo um *plenum* onde há matéria em todos os pontos do espaço, de tal forma que, se uma única partícula se move, há a necessidade de toda uma série de outros corpos se moverem para

Young quem introduziu o conceito de interferências e com isso explicou a formação dos anéis de cores a partir do modelo ondulatório). Em relação à difração, que hoje em dia também é explicada em termos ondulatórios, em analogia com a curvatura das ondas na água ou das ondas sonoras ao passarem perto de obstáculos, Newton a explicava em termos de forças mútuas entre a matéria e os corpúsculos de luz (ver Questões 1, 2, 4, 5, 20, e 29), força essa análoga à que atua na refração da luz. Na Questão 28 Newton distingue a curvatura (ao passar perto de um obstáculo) das ondas na água e das ondas sonoras, da curvatura dos raios de luz: "Os raios [de luz] que passam muito próximos das bordas de qualquer corpo são um pouco curvados pela ação do corpo, como mostramos acima, porém essa curvatura não se dá em direção à sombra, mas a partir da sombra, e é executada apenas na passagem do raio perto do corpo e a uma distância muito pequena dele. Tão logo o raio tenha passado pelo corpo, segue em linha reta".

A terceira fonte para a crença num modelo corpuscular da luz foi a invariância das propriedades da luz, em especial a permanência da cor. Newton mostrou que qualquer uma das cores homogêneas obtidas depois da decomposição da luz branca por um prisma permanecem sempre as mesmas sejam quais forem as novas reflexões, refrações e inflexões que essa luz homogênea sofra, e que não são geradas novas cores nesses processos. Mais tarde, ao explicar a dupla refração através dos "lados" da luz, Newton introduziu essa nova propriedade original e imutável nos raios de luz (Questão 26). Na Questão 29, ao expor claramente seu modelo corpuscular da luz, Newton afirma: "Eles [os corpúsculos emitidos pelas substâncias que brilham, e que constituiriam os raios de luz] também serão capazes de possuir várias propriedades e de conservar imutáveis suas propriedades ao atravessar vários meios, o que é outra condição dos raios de luz".

Este livro de Newton é considerado por todos como sendo, entre as grandes obras científicas já surgidas até hoje, das que oferecem leitura das mais agradáveis e acessíveis ao leitor leigo. Além de não exigir nenhum conhecimento matemático avançado, é escrito de maneira clara e sugestiva. Newton mostra aqui seus dotes de grande expositor, explicando com maestria e perfeição suas belas experiências e as conclusões a que chegou. Outro aspecto que chama a atenção de qualquer leitor é a riqueza de assuntos abordados. Em termos de óptica, discutem-se a origem das cores e a formação do arco-íris, os anéis coloridos que surgem em lâminas finas de vidro e bolhas de sabão (espessura aproximada de 10^{-7} m), o funcionamento da visão, o que são o fogo e a chama, o funcionamento dos telescópios etc. Em termos mais amplos, discutem-se também a origem ou causa da gravitação e da coesão dos corpos, o funcionamento das reações químicas, a natureza do vácuo e do éter, como fazer experiências

Faremos agora um exame geral da *Óptica*, tal como ela aparece na quarta e última edição inglesa, de 1730. O subtítulo é: "Um Tratado das Reflexões, Refrações, Inflexões e Cores da Luz"⁸. O que Newton chama de "inflexão da luz" é o que hoje em dia se chama difração, fenômeno descoberto por Grimaldi em 1665 (Grimaldi já usava o termo *difração* para descrever o fenômeno, enquanto o termo *inflexão* se deve a Hooke). A *Óptica* é constituída por três livros. O Livro I se divide em duas partes e trata essencialmente da decomposição da luz branca nas cores do espectro ao atravessar um prisma, além de assuntos correlatos. A primeira parte contém 8 definições, 8 axiomas, 8 proposições (6 teoremas e 2 problemas) e 16 experiências. Na segunda parte há 11 proposições (5 teoremas e 6 problemas) e 17 experiências. O Livro II divide-se em quatro partes e trata essencialmente das cores produzidas por corpos transparentes delgados e espessos (anéis de Newton). Na primeira parte há 24 observações, a segunda apresenta comentários sobre essas observações, na terceira há 20 proposições e na quarta 13 observações. No Livro III há 11 observações sobre inflexão (difração) da luz e em seguida aparecem as famosas 31 questões (*queries*). Destas, as primeiras 16 apareceram na primeira edição inglesa, de 1704. Na edição em latim, aparecida em 1706 (preparada por Samuel Clarke, a pedido de Newton), acrescentaram-se 7 novas questões que se tornaram as questões 25 a 31 das edições posteriores em inglês (o mesmo ocorrendo nesta edição em português). Na segunda edição inglesa de 1717 apareceram 8 novas questões que ficaram sendo as questões 17 a 24 dessa e das edições posteriores. Na terceira e quarta edições inglesas não houve modificações maiores no conteúdo e na ordem das questões.

Embora a estrutura do livro se pareça formalmente com a de *Os Elementos* de Euclides (definições, axiomas, proposições e teoremas), a semelhança é mais estética do que real. As provas das proposições ou teoremas, por exemplo, raramente seguem uma estrutura rigorosa de prova matemática, onde se encadeiam logicamente axiomas, definições e lemas para se chegar ao resultado proposto. As provas que Newton apresenta para seus teoremas e proposições são baseadas em demonstrações por experiências, (suas próprias palavras). Além disso, nos Livros II e III o que temos basicamente são observações relativas a fenômenos novos (não contidos nas definições ou axiomas iniciais ou deles deriváveis) e comentários sobre essas observações⁹.